

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΤΥΠΟΥ FPG ΓΙΑ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥΣ ΩΣ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ 1Pa-15kPa

Ν. Βασιλειάδης¹, Σ. Νάρης², Δ. Βαλουγεώργης³

¹Υποψήφιος Διδάκτωρ, ²Συνεργάτης Ερευνητής, ³Καθηγητής
Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών διεργασιών,

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας,
Πεδίον Άρεως, 38334, Βόλος

E-mail: ¹nikovasi@mie.uth.gr, ²snaris@mie.uth.gr, ³diva@mie.uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενεργή επιφάνεια τριών συσκευών μέτρησης πίεσης τύπου πιστονιού επιβαλλόμενης ισορροπίας FPG8601 στο εύρος πίεσης λειτουργίας μεταξύ 1Pa και 15kPa υπολογίζεται με ακρίβεια τόσο για λειτουργία μέτρησης απόλυτης όσο και σχετικής πίεσης. Τρία εθνικά μετρολογικά ινστιτούτα και συγκεκριμένα, το PTB (Γερμανία), το INRiM (Ιταλία) και το RISE (Σουηδία) παρέιχαν γεωμετρικά δεδομένα που αφορούν τις συσκευές του συγκεκριμένου τύπου που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις τους. Το κυρίως ζήτημα που ανακύπτει είναι ο υπολογισμός της ενεργής επιφάνειας των συσκευών που επηρεάζεται σημαντικά από τις δυνάμεις που ασκούνται στο πιστόνι λόγω της ροής αερίου στο διάκενο μεταξύ πιστονιού-κυλίνδρου. Στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση τη ροής στο διάκενο πιστονιού-κυλίνδρου και σε αντίθεση με την ως τώρα πρακτική της χρήσης της προσέγγισης Dadson, εφαρμόζεται η τροποποιημένη εξίσωση Boltzmann όπου ο όρος των συγκρούσεων αντικαθίσταται από το μοντέλο BGK. Αυτό κρίνεται απαραίτητο καθώς ο αριθμός Knudsen μεταβάλλεται σημαντικά εντός της ροής και σε πολλές περιπτώσεις η ροή θα πρέπει να εξεταστεί ως αραιοποιημένη. Τέλος, πραγματοποιείται και η ανάλυση αβεβαιότητας των εξαγόμενων τιμών που αφορούν την ενεργή επιφάνεια, όπου εξετάζεται η επίδραση διαφόρων παραγόντων στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων όπως η γεωμετρική αβεβαιότητα, η θερμοκρασία, ο συντελεστής αλληλεπίδρασης επιφάνειας-αερίου και άλλα. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν αβεβαιότητα της τάξης των 1×10^{-5} ppm. Καθώς τα αποτελέσματα βασίζονται αποκλειστικά σε γεωμετρικά στοιχεία και υπολογιστικές προσεγγίσεις οι συσκευές μπορούν να χαρακτηριστούν πλέον ως πρωτεύοντα πρότυπα.

Λέξεις Κλειδιά:

Μετρολογία, Πρωτεύον πρότυπο πίεσης, FPG, Κινητική θεωρία, Μικροαγωγός

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πολλές βιομηχανικές αλλά και εργαστηριακές εφαρμογές, υπάρχουν διεργασίες όπου η μέτρηση πίεσης στο εύρος μεταξύ 1 Pa και 15kPa είτε ως απόλυτη είτε ως σχετική πίεση, αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την ορθή λειτουργία των εγκαταστάσεων και την ομαλή εξέλιξη των διεργασιών. Η πετροχημική και η φαρμακευτική βιομηχανία καθώς και ο κλάδος των ηλεκτρονικών, αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα όπου σε πολλές φάσεις της παραγωγής εμφανίζονται επίπεδα πίεσης στο αναφερόμενο εύρος. Επομένως η ύπαρξη πιστοποιημένων οργάνων για την υλοποίηση των μετρήσεων με το ελάχιστο δυνατό εύρος απόκλισης αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της παραγωγής αλλά και του εξοπλισμού. Η αλληλουχία της βαθμονόμησης των μετρητικών διατάξεων, οδηγεί πάντα σε κάποιο πρωτεύον πρότυπο μέτρησης πίεσης. Τα πρότυπα αυτά, απαιτείται να έχουν την μέγιστη δυνατή ακρίβεια, αλλά κυρίως θα πρέπει να μπορεί να επιβεβαιωθεί η ακρίβεια των ενδείξεων, όχι

μέσω σύγκρισης με άλλα όργανα μέτρησης αλλά με βάση θεωρητικές αρχές φυσικής και διαστατικές μόνο μετρήσεις.

Μέχρι στιγμής, δεν υπάρχουν συσκευές που να έχουν πιστοποιηθεί με βάση τη παραπάνω μεθοδολογία όσον αφορά το εύρος πίεσης μεταξύ 1 Pa και 15kPa. Συσκευές που χρησιμοποιούνται για την διακρίβωση οργάνων μέτρησης πίεσης και διαθέτουν τα χαρακτηριστικά ώστε να μπορέσουν να πιστοποιηθούν ως πρωτεύοντα πρότυπα είναι οι μετρητές τύπου πιστονιού επιβαλλόμενης ισοροπίας, εξοπλισμένοι με μη-περιστρεφόμενη διάταξη πιστονιού-κυλίνδρου (Ooiwa, 1994). Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η συσκευή FPG8601 (Krajíček, 2014) που ανήκει στην συγκεκριμένη κατηγορία. Αποτελεί στοιχείο εξοπλισμού και συσκευή αναφοράς σε πολλά Μετρολογικά Ινστιτούτα και χρησιμοποιείται για βαθμονομήσεις τόσο σε συσκευές μέτρησης απόλυτης όσο και σχετικής πίεσης.

Τα προηγούμενα χρόνια πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ συσκευών διαφορετικών Ινστιτούτων με στόχο την διαπίστωση της ισοδυναμίας μεταξύ των συσκευών (Perkin et al. 1999, Ricker et al 2017) . Όμως ελάχιστες προσπάθειες έγιναν για την πιστοποίηση των συσκευών ως πρωτεύοντα πρότυπα, και αυτές χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία. Προκειμένου να χαρακτηριστεί μια συσκευή ως πρωτεύον πρότυπο, όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν την μέτρηση θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και να ποσοτικοποιηθούν. Στις συσκευές αυτές, η κυριότερη παράμετρος που απαιτείται να είναι γνωστή για την πραγματοποίηση της μέτρησης, είναι η τιμή της ενεργής επιφάνειας του πιστονιού (Aeff), που σε συνδυασμό με την μέτρηση της ασκούμενης δύναμης στο πιστόνι επιτρέπει τον υπολογισμό της πίεσης στο χώρο ελέγχου. Η ενεργός επιφάνεια εξαρτάται από την συνολική δύναμη που ασκείται στο πιστόνι κατά την διάρκεια μέτρησης συγκεκριμένης πίεσης αλλά και το μέγεθος της μετρούμενης πίεσης και επομένως αποτελεί μεταβλητό μέγεθος. Η δύναμη που υπεισέρχεται στον υπολογισμό του Aeff περιλαμβάνει μεταξύ άλλων και τη δύναμη που ασκείται στο πιστόνι λόγω της ροής αερίου στο διάκενο μεταξύ πιστονιού-κυλίνδρου. Η δύναμη αυτή πρέπει να υπολογιστεί με ακρίβεια και με βάση την πραγματική γεωμετρία της κάθε συσκευής και όχι ιδανικές προσεγγίσεις. Αυτό μπορεί να γίνει με χρήση κατάλληλου λογισμικού ώστε μέσω του υπολογισμού της κατανομής πίεσης κατά μήκος του διακένου να μπορέσει να υπολογιστεί η δύναμη που ασκείται στο πιστόνι με ακρίβεια και αξιοπιστία.

Οι διαστάσεις του διακένου και κυρίως το πλάτος αυτού είναι πολύ μικρό και κυμαίνεται μεταξύ 1μm και 6 μm. Ταυτόχρονα η πίεση που επικρατεί, ιδιαίτερα κατά την μέτρηση απόλυτης πίεσης είναι επίσης πολύ μικρή. Ο συνδυασμός των δύο αυτών συνθηκών σημαίνει ότι η μέση ελεύθερη μοριακή διαδρομή μεταξύ δυο διαδοχικών συγκρούσεων των σωματιδίων του αερίου είναι αντίστοιχης τάξης με τη διάσταση του καναλιού και επομένως οι τυπικές προσεγγίσεις της μηχανικής ρευστών του συνεχούς μέσου ή αντίστοιχες απλοποιημένες προσεγγίσεις όπως η θεωρία Dadson δεν μπορούν να εφαρμοστούν καθώς δεν μπορούν να περιγράψουν τα ροϊκά φαινόμενα.

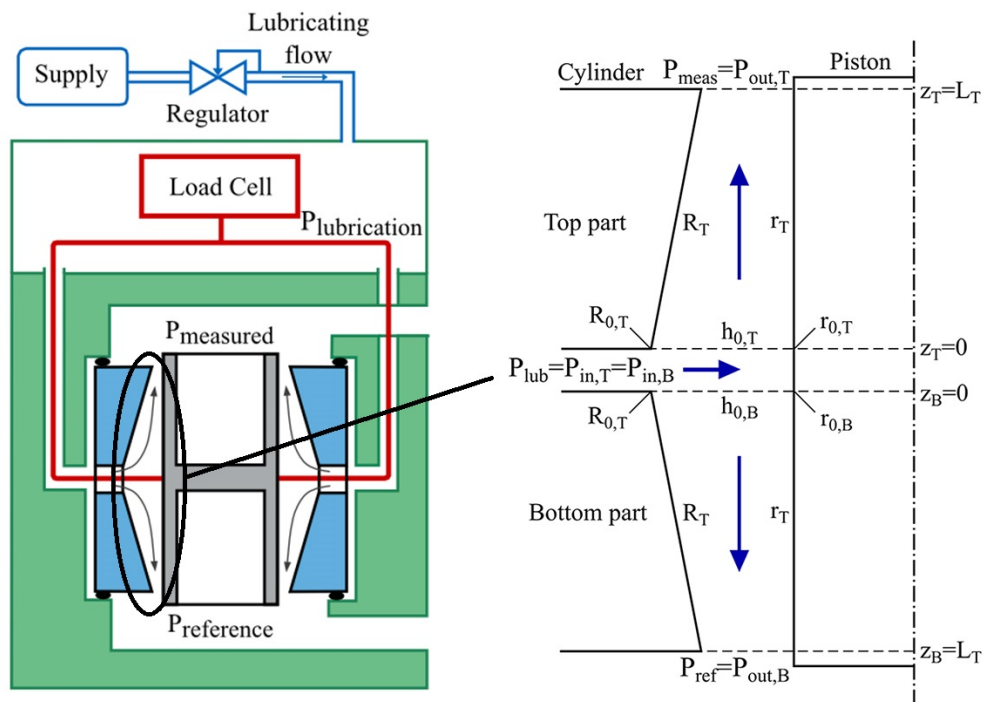
Η εναλλακτική προσέγγιση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η κινητική θεωρία και πιο συγκεκριμένα η χρησιμοποίηση κινητικών μοντέλων. Αποτελεί υπολογιστική προσέγγιση που εφαρμόζεται με μεγάλη επιτυχία εδώ και δεκαετίες σε επίλυση ροών υπό συνθήκες κενού (Jousten, 2008, Naris et al, 2014) αλλά και ροές εντός μικρυσυσκευών (Kandlikar et al, 2013, Sharipov, 2016). Ειδικότερα η κινητική εξίσωση B-BGK η οποία βασίζεται στην εξίσωση Boltzmann (Cercignani, 1975) με αντικατάσταση του όρου των συγκρούσεων από το μοντέλο BGK και η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, έχει εφαρμοστεί για την επίλυση ροών λόγω κλίσης πίεσης παράγοντας αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια, ιδιαίτερα για ισοθερμοκρασιακές ροές. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι είναι εφαρμόσιμη σε όλο το εύρος του αριθμού Knudsen, κάτι που επιτρέπει την ενιαία επίλυση όλου του ροϊκού πεδίου χωρίς την ανάγκη σύζευξης μεσοσκοπικών και μακροσκοπικών μοντέλων. Τα τελευταία χρόνια επίσης, αντίστοιχη μεθοδολογία έχει εφαρμοστεί και στην προσομοίωση πρωτεύοντων συσκευών μέτρησης πίεσης (Hashad et al, 2019, Sharipov et al, 2016, Naris et al, 2019).

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια αναλυτική υπολογιστική προσέγγιση για τον υπολογισμό της ενεργής επιφάνειας όπου για τον υπολογισμό της ροής εντός του διακένου πιστονιού-κυλίνδρου

χρησιμοποιείται η εξίσωση B-BGK. Η ενεργή επιφάνεια υπολογίζεται σε όλο το εύρος ονομαστικής λειτουργίας της συσκευής FPG8601 (1Pa-15kPa). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε τρεις συσκευές του συγκεκριμένου τύπου για τις οποίες υπάρχουν γεωμετρικά δεδομένα τα οποία έχουν διατεθεί από τα ινστιτούτα στα οποία αυτά είναι εγκατεστημένα και πιο συγκεκριμένα το PTB (Γερμανία), το RISE (Σουηδία) και το INRiM (Ιταλία). Επίσης, παρουσιάζεται η αβεβαιότητα που υφίσταται στις μετρήσεις λόγω διαφόρων παραγόντων όπως η αβεβαιότητα των γεωμετρικών δεδομένων, ο συντελεστής αλληλεπίδρασης ρευστού-επιφάνειας (accommodation coefficient), η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η χρήση της κινητικής εξίσωσης έναντι της εξίσωσης Boltzmann.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

Τα κύρια στοιχεία της συσκευής παρουσιάζονται στο Σχήμα 1 και είναι το πιστόνι, ο κύλινδρος που το περικλείει, ο ζυγός μέτρησης της δύναμης και οι δύο κοιλότητες όπου, στην άνω υπάρχει αέριο στην μετρούμενη πίεση ενώ στην κάτω επικρατεί η πίεση αναφοράς η οποία παραμένει σταθερή και είναι ίση με 1 Pa στην περίπτωση μέτρησης απόλυτης πίεσης και 100 kPa για την περίπτωση μέτρησης σχετικής πίεσης. Ο κύλινδρος διαθέτει εσωτερική κωνική διαμόρφωση ώστε το διάκενο μεταξύ πιστονιού-κύλινδρου να είναι μέγιστο στο κέντρο της συσκευής (6 μm, ονομαστικό) και ελάχιστο στις άκρες του πιστονιού (1 μm, ονομαστικό). Στο διάκενο εισέρχεται αέριο από το κέντρο του κυλίνδρου σε υπερπίεση 40kPa σε σχέση με την πίεση αναφοράς, που λειτουργεί ως λιπαντικό, ενώ επιτρέπει ταυτόχρονα την ευθυγράμμιση του πιστονιού.



Σχήμα 1: Γεωμετρία αισθητήρα FPG8601 και τομή του διακένου πιστονιού-κύλινδρου.

Η αρχή λειτουργίας έγκειται στην μέτρηση της μεταβολής της δύναμης (Fread) που δέχεται ο ζυγός σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή όταν και στις δύο κοιλότητες επικρατεί η ίδια πίεση (P_{ref}). Στην συνέχεια, με χρήση των διαστάσεων της ενεργής επιφάνειας του πιστονιού, υπολογίζεται η επικρατούσα στην άνω κοιλότητα πίεση. Η χρήση της ενεργής επιφάνειας έναντι της γεωμετρικής οφείλεται στις άσκησης δυνάμειων στο πιστόνι λόγω της ροής του λιπαντικού και είναι αναγκαία προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η ακρίβεια της μέτρησης.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Ο υπολογισμός της ενεργής επιφάνειας, η εξάρτησή της από την μετρούμενη πίεση και η εκτίμηση της αβεβαιότητας που την συνοδεύει, αποτελούν κρίσιμα χαρακτηριστικά της συσκευής. Με βάση τον ορισμό της η ενεργή επιφάνεια υπολογίζεται από την σχέση

$$A_{\text{eff}} = \frac{F_{\text{read}}}{P_{\text{meas}} - P_{\text{ref}}} \quad (1)$$

Η συσκευή μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα, το ένα από την περιοχή εισόδου του λιπαντικού αερίου μέχρι τον θάλαμο της πίεσης αναφοράς (κάτω τμήμα) και το δεύτερο αντίστοιχα από την περιοχή εισόδου του λιπαντικού αερίου μέχρι τον θάλαμο της μετρούμενης πίεσης (άνω τμήμα). Η συνεισφορά του κάθε τμήματος στην διαμόρφωση της ενεργής επιφάνειας μπορεί να υπολογιστεί χωριστά και στη συνέχεια να γίνει ο προσδιορισμός της τελικής ενεργής επιφάνειας. Σημειώνεται ότι η συνεισφορά του κάτω τμήματος είναι σταθερή καθώς η πίεση στα δύο άκρα δεν επηρεάζεται από την μετρούμενη πίεση και επομένως μπορεί να υπολογιστεί μια φορά για κάθε κατάσταση λειτουργίας (μέτρηση απόλυτης και μέτρηση σχετικής πίεσης) και να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ενεργού επιφάνειας σε όλο το φάσμα της μετρούμενης πίεσης.

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πιστόνι και πρέπει να συνυπολογιστούν για τον υπολογισμό της ενεργής επιφάνειας είναι α) η δύναμη λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δύο θαλάμων, β) η διατμητική δύναμη λόγω της κυκλοφορίας του λιπαντικού αερίου και γ) η ορθή τάση που ασκείται στην επιφάνεια του πιστονιού στην κατακόρυφη διεύθυνση και οφείλεται στις μικρομεταβολές της ακτίνας του πιστονιού στην κατακόρυφη διεύθυνση. Θεωρώντας ότι ο λόγος του πλάτους του διακένου ως προς την ακτίνα του πιστονιού είναι πολύ μικρός, χρησιμοποιώντας αρχές της μηχανικής ρευστών και ολοκληρώνοντας κατά μήκος του καναλιού, προκύπτει η σχέση για τον υπολογισμό των πάνω (A_T) και κάτω (A_B) ενεργών επιφανειών της συσκευής (Dadson et al, 1982) ως:

$$A_i = \pi r_{0,i}^2 \left(1 + \frac{h_{0,i}}{r_{0,i}} - \frac{1}{r_{0,i}(P_{\text{in},i} - P_{\text{out},i})} \int_0^{L_i} (R_i - R_{0,i} + r_i - r_{0,i}) \frac{dP_i}{dz_i} dz_i \right), \quad i=T,B \quad (2)$$

Η σχέση αυτή είναι γενική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε συσκευή τύπου πιστονιού-κυλίνδρου. Στην συσκευή FPG8601, για τον υπολογισμό της συνολικής ενεργής επιφάνειας χρειάζεται να ληφθούν υπόψη τόσο οι δυνάμεις που ασκούνται στο άνω και κάτω τμήμα του πιστονιού (F_T και F_B αντίστοιχα), όσο και η εναπομείνουσα δύναμη κατά την διαδικασία μηδενισμού του ζυγού F_0 . Η συνολική δύναμη που ασκείται στο πιστόνι τελικά είναι $F = F_B - F_T - F_0$. Η ενεργή επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$A_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{meas}} A_T - P_{\text{ref}} A_{T,0}}{P_{\text{meas}} - P_{\text{ref}}} - \frac{P_{\text{lub}} (A_T - A_{T,0})}{P_{\text{meas}} - P_{\text{ref}}} \quad (3)$$

Όπου $A_{T,0}$ είναι η ενεργή επιφάνεια του άνω τμήματος κατα την διαδικασία μηδενισμού του ζυγού.

Όπως είναι φανερό από τις εξισώσεις (1) και (2), αν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυλίνδρου και του πιστονιού είναι γνωστά, η μόνη άγνωστη παράμετρος είναι η κατανομή της πίεσης εντός του διακένου. Στην υδροδυναμική περιοχή, η κατανομή μπορεί να προσδιοριστεί από την αναλυτική λύση της πλήρως ανεπτυγμένης ροής Poiseuille μέσω της οποίας προκύπτει

$$P_i(z_i) = \left[P_{\text{in},i}^2 - (P_{\text{in},i}^2 - P_{\text{out},i}^2) \frac{\int_0^{z_i} h_i^{-3} dz_i}{\int_0^{L_i} h_i^{-3} dz_i} \right]^{1/2} \quad (4)$$

Οι χαμηλές πιέσεις όμως που επικρατούν και οι μικρές διαστάσεις του διάκενου καθιστούν αναγκαίο το να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα αραιοποίησης. Στην περίπτωση αυτή, η κατανομή της πίεσης δίδεται από την σχέση

$$\frac{dP_i}{dz_i} = \frac{\dot{M}_i u_0}{2\pi G h_i (R_i^2 - r_i^2)} \quad (5)$$

με οριακές συνθήκες κάθε φορά την πίεση στα δύο άκρα του διακένου. Στην εξίσωση (5) u_0 είναι η πιθανότερη μοριακή ταχύτητα και $G(\delta, r/R)$ είναι η αδιάστατη παροχή.

Με βάση τις οριακές συνθήκες, εφαρμόζεται ένα επαναληπτικό σχήμα όπου χρησιμοποιείται μια αρχική υπόθεση για την παροχή μάζας για τον υπολογισμό της κατανομής της πίεσης. Στην συνέχεια, ανάλογα με την απόκλιση που εμφανίζεται από την οριακή συνθήκη στην έξοδο, πραγματοποιείται διόρθωση στην εκτίμηση της μαζικής παροχής. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ικανοποίηση των οριακών συνθηκών και η λύση που αφορά την κατανομή της πίεσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ενεργής επιφάνειας.

Όπως είναι εμφανές, απαραίτητο στοιχείο για την επίλυση της εξίσωσης (5) είναι η αδιάστατη παροχή $G(\delta, r/R)$. Καθώς αυτή αποτελεί συνάρτηση τόσο της παραμέτρου αραιοποίησης δ , που είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού Knudsen, όσο και του τοπικού λόγου της ακτίνας του πιστονιού r και του κυλίνδρου R , απαιτείται η δημιουργία μιας πυκνης βάσης δεδομένων όσον αφορά την παράμετρο G για όλο το αναγκαίο εύρος των παραμέτρων δ και r/R με χρήση της κινητικής εξίσωσης B-BGK και της μεθόδου των διακριτών ταχυτήτων. Στην παρούσα εργασία και προκειμένου να καλυφθούν όλα τα σενάρια λειτουργίας υπολογίστηκαν οι τιμές του G για $\delta \in [10^{-10}, 10^4]$ και $r/R \in [0.99, 0.99999]$. Επίσης, καθώς μελετάται και η επίδραση του συντελεστή αλληλεπίδρασης αερίου-επιφάνειας, δημιουργήθηκε η ίδια βάση δεδομένων και για τις τρεις τιμές του συντελεστή αλληλεπίδρασης $\alpha = [1, 0.9, 0.8]$.

Προκειμένου να υπολογιστεί η αβεβαιότητα που υπεισέρχεται στα αποτελέσματα που αφορούν της ενεργή επιφάνεια λόγω της αντίστοιχης αβεβαιότητας στις διαστατικές μετρήσεις των συσκευών, ζητήθηκε από τα αντίστοιχα Ινστιτούτα που παρείχαν τις μετρήσεις να προσδιορίσουν την αντίστοιχη αβεβαιότητα. Οι τιμές αυτές αφορούν την αβεβαιότητα στις μετρήσεις του πιστονιού u_p και την αντίστοιχη στις μετρήσεις του κυλίνδρου u_d . Η τυπική αβεβαιότητα που προκύπτει για την ενεργή επιφάνεια είναι

$$\frac{u_d(A_{\text{eff}})}{A_{\text{eff}}} = \frac{\sqrt{u_p^2 + u_c^2}}{2R_m} \quad (6)$$

όπου R_m είναι η τοπική μέση τιμή της ακτίνας του κυλίνδρου και του πιστονιού. Η σχέση (7) υποθέτει ότι η αβεβαιότητα στις μετρήσεις του πιστονιού και του κυλίνδρου είναι ασυσχέτιστες, κάτι που έχει αποδειχθεί σε αντίστοιχες εργασίες (Sabuga, 2011).

Εκτός όμως από την αβεβαιότητα που υπεισέρχεται λόγω των διαστατικών μετρήσεων, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που συμβάλουν στην αβεβαιότητα της τιμής της ενεργής επιφάνειας. Τέτοιες παράμετροι είναι όπως ανφέρθηκε η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η χρήση της κινητικής εξίσωσης έναντι της εξίσωσης Boltzmann. Για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι ο προσδιορισμός της ενεργής επιφάνειας για το βασικό σενάριο και στην συνέχεια ο προσδιορισμός της ενεργής επιφάνειας με μια εκ των παραμέτρων διαφοροποιημένη. Το βασικό σενάριο αφορούσε θερμοκρασία 20°C, συντελεστή αλληλεπίδρασης αερίου-επιφάνειας $\alpha=1$, ξηρό άζωτο (σχετική υγρασία μηδέν) και χρήση για την επίλυση την κινητική εξίσωση B-BGK. Σε κάθε μια περίπτωση η αβεβαιότητα υπολογίζεται ως

$$\frac{u_j(A_{\text{eff}})}{A_{\text{eff}}} = \frac{\Delta_j(A_{\text{eff}})}{A_{\text{eff}}} \quad (7)$$

ενώ η συνολική αβεβαιότητα που αφορά τον υπολογισμό της ενεργού επιφάνειας προκύπτει ως η Ευκλείδεια νόρμα όλων των υπό διερεύνηση αβεβαιοτήτων

$$\frac{u(A_{\text{eff}})}{A_{\text{eff}}} = \left[\sum_j \left(\frac{u_j(A_{\text{eff}})}{A_{\text{eff}}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (8)$$

και αφορά την συνολική τυπική αβεβαιότητα.

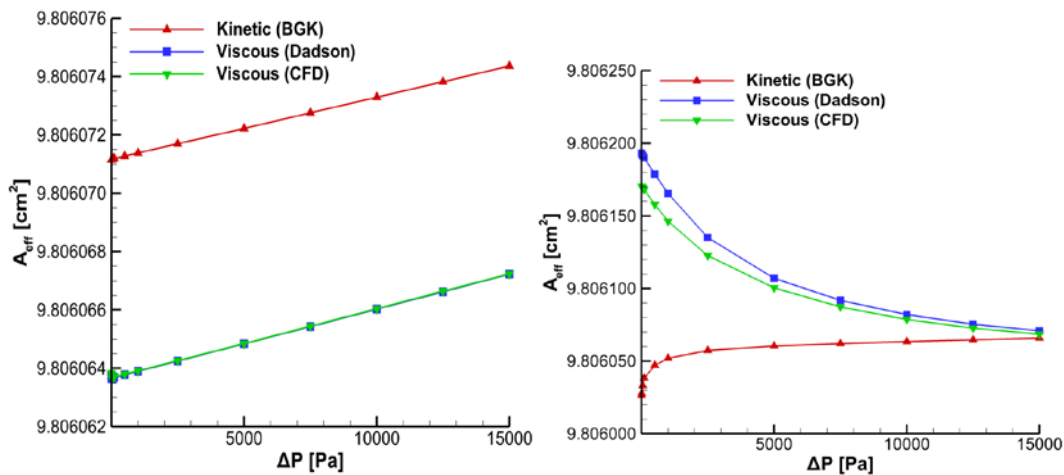
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν και τις τρεις συσκευές που ήταν διαθέσιμες. Στον Πίνακα 1 δίνονται τα στοιχεία που αφορούν τις διαστατικές μετρήσεις στις οποίες βασίστηκαν οι προσομοιώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε οκτώ γωνιακές θέσεις. Όμως στην περίπτωση του INRiM, καθώς το μετρούμενο μέγεθος ήταν η διάμετρος, πραγματικά ανεξάρτητες μπορούν να θεωρηθούν μόνο οι 4 εξ αυτών. Διαφοροποιήσεις επίσης παρατηρήθηκαν στον αριθμό των αξονικών σημείων που όμως δεν επηρεάζουν ουσιαστικά τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Τέλος, σημειώνεται ότι υπάρχει σημαντικά αυξημένη αβεβαιότητα στα αποτελέσματα του RISE, κάτι που οφείλεται αποκλειστικά στον εξοπλισμό και την μεθοδολογία που ακολουθήθηκαν.

Πίνακας 1: Δεδομένα διαστατικών μετρήσεων για τις τρεις συσκευές FPG8601.

Ινστιτούτο	PTB		RISE		INRiM	
	Ανω	Κάτω	Ανω	Κάτω	Ανω	Κάτω
Τμήμα συσκευής						
Αριθμός γωνιακών θέσεων	8	8	8	8	4	4
Αριθμός αξονικών σημείων	343	339	317	346	69	69
Μήκος μετρήσεων/mm	34.2	33.8	31.6	34.5	34.0	34.0
Διακένο στην είσοδο / μm	4.646	4.414	3.889	3.784	4.238	4.131
Μέσο πλάτος διάκενου/ μm	2.511	2.551	2.617	2.490	2.474	2.486
Διακένο στην έξοδο / μm	2.013	2.155	1.015	1.553	1.087	0.922
Μέση ακτίνα-πιστόνι/mm	17.6664	17.6664	17.6658	17.6658	17.6658	17.6658
Μέση ακτίνα-κυλίνδρος/mm	17.6689	17.6689	17.6684	17.6683	17.6683	17.6683
Μέση επιφάνεια-πιστονι/ cm^2	9.80496	9.80494	9.80431	9.80433	9.80433	9.80432
Διαστατική αβεβαιότητα/nm	25	25	200	200	26	26

Προκειμένου να ελεγχθεί η ανάγκη χρησιμοποίησης της κινητικής προσέγγισης και να προσδιοριστεί η απόκλιση της υδροδυναμικής προσέγγισης, πραγματοποιήθηκαν επίσης προσομοιώσεις με βάση την θεωρία Dadson αλλά και τυπικά εργαλεία CFD που βασίζονται στην επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι τιμές της ενεργού επιφάνειας της συσκευής FPG8601 που ανήκει στο Ινστιτούτο PTB όπως αυτές υπολογίστηκαν και με τις τρεις προσεγγίσεις. Είναι εμφανές ότι η μέθοδος Dadson δίνει αποτελέσματα ταυτόσημα με την πλήρη επίλυση του ροϊκού πεδίου χρησιμοποιώντας τις υδροδυναμικές εξισώσεις. Όμως, και οι δύο μέθοδοι εμφανίζουν σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με τις πραγματικές τιμές που προκύπτουν από την κινητική θεωρία. Ειδικότερα στην περίπτωση της μέτρησης σχετικής πίεσης παρατηρείται μια απόκλιση της τάξης του 1 rpm που μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή, ανάλογα βέβαια και με τις απαιτήσεις. Όμως στην περίπτωση της μέτρησης απόλυτης πίεσης, η διαφοροποίηση είναι της τάξης των 170 rpm και η οποία προοδευτικά μειώνεται στο επίπεδο των 10 rpm. Στην περίπτωση αυτή οι αποκλίσεις δεν μπορούν αν γίνουν αποδεκτές και είναι προφανές ότι η υδροδυναμική προσέγγιση αδυνατεί να αντιμετωπίσει ροές που εμφανίζουν φαινόμενα αραιοποίησης. Γενικότερα όμως, ακόμα και στην περίπτωση της μέτρησης σχετικής πίεσης, η χρήση της υδροδυναμικής προσέγγισης δεν συνιστάται καθώς το ακριβές σημείο της εμφάνισης φαινομένων αραιοποίησης γίνεται γνωστό μόνο εφόσον έχει επιλυθεί το ροϊκό πεδίο και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και ιδιαίτερα από την ακριβή γεωμετρία της συσκευής. Επομένως μόνο η χρήση της κινητικής προσέγγισης εξασφαλίζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 2: A_{eff} αισθητήρα FPG8601 (PTB) για μέτρηση σχετικής (αριστερά) και απόλυτης (δεξιά) πίεσης.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν την ενεργή επιφάνεια των τριών συσκευών σε λειτουργία μέτρησης τόσο σχετικής όσο και απόλυτης πίεσης. Στην πρώτη περίπτωση, η ενεργή επιφάνεια αυξάνεται καθώς η μετρούμενη πίεση αυξάνεται για όλες τις συσκευές. Αντίθετα, σε συνθήκες μέτρησης απόλυτης πίεσης, για την συσκευή της PTB η ενεργή επιφάνεια αυξάνεται όσο αυξάνεται η μετρούμενη πίεση, ενώ στις άλλες δύο συσκευές η τάση είναι αντίθετη. Είναι εμφανές ότι δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα ως προς την εξάρτηση της ενεργής επιφάνειας από την πίεση καθώς η συμπεριφορά της κάθε συσκευής είναι διαφορετική, κάτι που οφείλεται σε μικρές αποκλίσεις της γεωμετρίας.

Πίνακας 2: A_{eff} [cm²] των τριών FPG8601 σε λειτουργία μέτρησης σχετικής και απόλυτης πίεσης.

ΔP [Pa]	Πίεση αναφοράς 10^5 Pa			Πίεση αναφοράς 1 Pa		
	PTB	RISE	INRiM	PTB	RISE	INRiM
2	9.8060712	9.8050698	9.8051821	9.8060260	9.8052474	9.8052480
10	9.8060712	9.8050699	9.8051822	9.8060277	9.8052462	9.8052479
100	9.8060712	9.8050699	9.8051822	9.8060383	9.8052405	9.8052447
1000	9.8060714	9.8050703	9.8051827	9.8060519	9.8051929	9.8052307
2500	9.8060717	9.8050710	9.8051837	9.8060573	9.8051607	9.8052154
5000	9.8060722	9.8050722	9.8051852	9.8060604	9.8051389	9.8052040
7500	9.8060728	9.8050734	9.8051868	9.8060621	9.8051286	9.8051980
10000	9.8060733	9.8050746	9.8051883	9.8060635	9.8051225	9.8051951
12500	9.8060738	9.8050758	9.8051898	9.8060647	9.8051188	9.8051940
15000	9.8060744	9.8050770	9.8051914	9.8060658	9.8051166	9.8051939

Τέλος, στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν τον υπολογισμό της αβεβαιότητας στις τιμές της ενεργής επιφάνειας για διάφορες παραμέτρους καθώς και την συνολική αβεβαιότητα για το δυσμενέστερο συνδυασμό αυτών. Είναι εμφανές ότι ο κυριότερος παράγοντας είναι η αβεβαιότητα των διαστατικών μετρήσεων. Όπως φαίνεται, η συσκευή του Ινστιτούτου RISE για την οποία οι διαστατικές μετρήσεις είχαν την μικρότερη ακρίβεια, έχει και την μεγαλύτερη αβεβαιότητα όσον αφορά την ενεργή επιφάνεια. Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι αβεβαιότητα στις μετρήσεις της τάξης των 25nm συμβάλει κατά 1 ppm στην αβεβαιότητα της ενεργής επιφάνειας όσον αφορά συσκευές τύπου FPG8601.

Ο δεύτερος σε σημασία παράγοντας είναι ο συντελεστής αλληλεπίδρασης αερίου-επιφανείας. Παρατηρείται ότι η αβεβαιότητα που προκύπτει μπορεί να είναι της τάξης ακόμα και των 2.5 ppm όμως η συμμετοχή του στην συνολική αβεβαιότητα στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι μικρή

λόγω της υπέρτερης επιρροής της διαστατικής αβεβαιότητας. Επίσης θα πρέπει να τονιστεί ότι οι εξεταζόμενες τιμές και ιδιαίτερα η τιμή 0.8 για τον συντελεστή αλληλεπίδρασης είναι ιδιαίτερα χαμηλές και με μικρή σχετικά πιθανότητα να αντιστοιχούν στις εν λόγω συσκευές.

Όσον αφορά την συνεισφορά των υπολοίπων παραγόντων, τουτέστιν της θερμοκρασίας του εισερχόμενου αερίου, του μοντέλου που χρησιμοποιείται για τον όρο των συγκρούσεων και της ύπαρξης σχετικής υγρασίας (για την οποία εξετάζεται το σενάριο αερίου με 50% σχετική υγρασία), η συνεισφορά τους μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα καθώς στην χειρότερη περίπτωση είναι της τάξης των 0.25 ppm που σε επίπεδο αβεβαιότητας ενεργής επιφάνειας μπορεί να παραβλεφθεί.

Πίνακας 3: Θεωρητική αβεβαιότητα (σε ppm) στην μέγιστη πίεση λειτουργίας και μέτρηση σχετικής και απόλυτης πίεσης.

Συσκευή	Πίεση αναφοράς 10^5 Pa			Πίεση αναφοράς 1 Pa		
	PTB	RISE	INRiM	PTB	RISE	INRiM
Διαστατική αβεβαιότητα	1.07	8.00	1.04	1.07	8.00	1.04
Συντ. αλληλεπίδρασης ($\alpha = 0.9$)	0.11	0.47	0.38	0.35	1.20	1.13
Συντ. αλληλεπίδρασης ($\alpha = 0.8$)	0.27	1.02	0.81	0.75	2.44	2.31
Θερμοκρασιακή διαφορά (± 1 K)	0.00	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05
Θερμοκρασιακή διαφορά (± 2 K)	0.01	0.02	0.02	0.03	0.11	0.10
Όρος συγκρούσεων (BGK vs BE)	0.03	0.11	0.09	0.05	0.25	0.19
Σχετική υγρασία (50 %)	0.00	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04
Συνολική αβεβαιότητα	1.11	8.07	1.32	1.31	8.38	2.55

Συνολικά μπορεί να συναχθεί ότι αν είναι γνωστή η διαστατική αβεβαιότητα για μια συσκευή τύπου FPG8601 τότε αυτή μπορεί να αντιστοιχηθεί με την συνολική αβεβαιότητα σε επίπεδο ενεργής επιφάνειας με αναλογία 1ppm ανα 25nm διαστατικής αβεβαιότητας καθώς οι υπόλοιποι παράγοντες μπορούν σε γενικές γραμμές να αγνοηθούν.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της ενεργής επιφάνειας συσκευών μέτρησης πίεσης τύπου πιστονιού-κυλίνδρου. Καθώς σε μεγάλο εύρος των πιέσεων λειτουργίας η ροή εντός των συσκευών αυτών είναι σε συνθήκες αραιοποίησης, είναι αναγκαία η χρήση της κινητικής προσέγγισης. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε σε τρεις συσκευές τύπου FPG8601 οι οποίες και χρησιμοποιούνται στα Μετρολογικά Ινστιτούτα της Ευρώπης PTB, RISE και INRiM. Αποδείχθηκε η αδυναμία των υδροδυναμικών προσεγγίσεων να επιλύσουν ικανοποιητικά τέτοιου είδους συστήματα. Από τον προσδιορισμό της ενεργού επιφάνειας των τριών συσκευών φάνηκε η ισχυρή επίδραση της γεωμετρίας και η αδυναμία εξαγωγής γενικά εφαρμόσιμων συμπερασμάτων ως προς την συσχέτιση της μετρούμενης πίεσης με την ενεργή επιφάνεια της συσκευής. Τέλος έγινε ανάλυση αβεβαιότητας που περιελάμβανε διάφορους παράγοντες. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι κύρια παράμετρος είναι η αβεβαιότητα των διαστατικών μετρήσεων η οποία και επηρεάζει κατά κύριο λόγο την αβεβαιότητα στην τιμή της ενεργής επιφάνειας με αναλογία 1 ppm για κάθε 25 nm διαστατικής αβεβαιότητας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς επιθυμούν να ευχαριστήσουν τα ερευνητικά Ινστιτούτα PTB, RISE και INRiM για την παροχή των διαστατικών δεδομένων. Η παρούσα έρευνα έχει μερικώς χρηματοδοτηθεί από το πρόγραμμα EMPIR συνχρηματοδοτούμενο από τα Κράτη-Μέλη και το πρόγραμμα Horizon 2020 της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσω της δράσης 14IND06-pres2vac.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Cercignani C. (1975), “Theory and Application of the Boltzmann”, Scottish Academic, 1975.

- Dadson R.S., Lewis S. and Peggs G. N., “The Pressure Balance: Theory and Practice”, London, HSMO, 1982.
- Hashad A. S., Ehlers S., Jusko O. and Sabuga W., “Characterization of a force-balanced piston gauge as a primary pressure standard”, *Measurement*, 2019, 131, 723-729.
- Jousten K. (2008), “Handbook of Vacuum Technology”, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany.
- Kandlikar S., Garimella S., Li D., Colin S. and King M. R.(2013), “Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels”, Elsevier.
- Krajíček Z., Bergoglio M., Jousten K., Otal P., Sabuga W., Saxholm S., Pražák D. and Vičar M. (2014), “Final report on EURAMET.M.P-K4.2010: Key and supplementary comparison of national pressure standards in the range 1 Pa to 15 kPa of absolute and gauge pressure” *Metrologia*, 51, Tech. Suppl. 07002.
- Naris S., Tantos C. and Valougeorgis D. (2014), “Kinetic modelling of a tapered Holweck pump”, *Vacuum*, 109, 341-348.
- Naris S., Vasileiadis N., Valougeorgis D., Hadhad A.S. and Sabuga W. (2019), “Computation of the effective area and associated uncertainties of non-rotating piston gauges FPG and FRS”, *Metrologia*, <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aee18>.
- Ooiwa A. (1994), “Novel non-rotational piston gauge with weight balance mechanism for the measurement of small differential pressures”, *Metrologia*, 30, p. 607-610.
- Perkin M., Rendle J., Jäger J., Deken P., Eldred K., Woodhead E., Härne G., Rantanen M., Thrane M., Le Guinio J. and Sardi M. (1999), “Comparison of European differential pressure standards in the range 3 Pa to 1000 Pa”, *Metrologia*, 36, 1-7.
- Ricker J., Hendricks J., Bock T., Pražák D., Kobata T., Torres J. and Sadkovskaya I. (2017), “Final report on the key comparison CCM.P-K4.2012 in absolute pressure from 1 Pa to 10 kPa”. *Metrologia*, 54, Tech. Suppl. 07002.
- Sabuga W. (2011), “Pressure measurements in gas media up to 7.5 MPa for the Boltzmann constant redetermination”, *Proc. 5th CCM International Conference on Pressure and Vacuum Metrology*, Berlin, 2011, PTB-Mitteilungen, 121, 247-255.
- Sharipov F. (2016), “Rarefied Gas Dynamics. Fundamentals for Research and Practice”, Wiley-VCH
- Sharipov F., Yang Y., Ricker J.E. and Hendricks J.H.(2016), “Primary pressure standard based on piston-cylinder assemblies. Calculation of effective cross sectional area based on rarefied gas dynamics”, *Metrologia*, 53, 1177-1184.